

вительность к перегрузкам, большой срок службы, цифровой вид информации.

Наряду с Я. г. возможны электронные гироскопы, в к-рых активной средой служат обычные парамагнетики (напр., стабильные свободные радикалы, атомы щелочных металлов). При одинаковых условиях вектор электронной намагниченности значительно больше вектора ядерной намагниченности, что позволяет получить большую точность; однако малые времена релаксации спинов затрудняют практич. реализацию.

Лит.: Малеев П. И., Новые типы гироскопов, Л., 1971; Померанцев Н. М., Рыжков В. М., Скроцкий Г. В., Физические основы квантовой магнетометрии, М., 1972; Курицки М. М., Голдштейн М. С., Инерциальная навигация, [пер. с англ.], «ТИИЭР», 1983, т. 71, № 10, с. 47; Woodman K. F., Franks P. W., Richards M. D., The nuclear magnetic resonance gyroscope: a review, «J. of Navigation», 1987, v. 40, № 3, p. 366.

А. Н. Шелаев.

ЯДЕРНЫЙ КВАДРУПОЛЬНЫЙ РЕЗОНАНС (ЯКР) — резонансное поглощение радиоволн атомными ядрами, уровни к-рых, вырожденные по спину, расщеплены вследствие взаимодействия электр. квадрупольного момента ядра с градиентами электр. внутрикристаллического поля. Т. н. чистый ЯКР наблюдается, в отличие от ядерного магн. резонанса (ЯМР), в отсутствие магн. поля. Взаимодействие квадрупольного момента ядра eQ с неоднородным кристаллич. полем E_x приводит к появлению ур-ней энергии ядра, соответствующих разл. ориентациям его спина I относительно оси симметрии oz кристаллич. поля [1].

Система ур-ней квадрупольного взаимодействия ядер определяется гамильтонианом:

$$\mathcal{H}_Q = \frac{eQ}{4I(2I-1)} [\Phi_{zz}(3\hat{I}_z^2 - I^2) + (\Phi_{xx} - \Phi_{yy})(\hat{I}_x^2 - \hat{I}_y^2)]. \quad (1)$$

Здесь \hat{I}_z — проекция спина ядра на ось oz , определяемая квантовым числом m ; Φ_{xx} , Φ_{yy} , Φ_{zz} — вторые производные потенциала ϕ электр. кристаллич. поля по координатам x , y , z , удовлетворяющие ур-нию Лапласа ($\Phi_{xx} + \Phi_{yy} + \Phi_{zz} = 0$). Это позволяет характеризовать поле 2 переменными: градиентом вдоль oz $eq = \Phi_{zz}$ и параметром асимметрии $\eta = (\Phi_{xx} - \Phi_{yy})/\Phi_{zz}$. Для аксиально-симметричного поля энергия ур-ней определяется ф-лой

$$\mathcal{E} = \frac{e^2qQ}{4I(2I-1)} [3m^2 - I(I+1)]. \quad (2)$$

Переходы между уровнями вызываются перем. магн. полем, перпендикулярным oz , с частотами, к-рые определяются значениями \mathcal{E} и правилами отбора $|\Delta m| = 1$. Если поле не является аксиально-симметричным, спектры ЯКР имеют более сложный вид.

Применения ЯКР в исследовании кристаллов, в частности полупроводников, основаны на связи между структурой кристаллов и значениями градиентов кристаллич. поля. При этом структура кристалла определяет непосредственно резонансные частоты ЯКР (в отличие от ядерного магнитного резонанса). Значения Φ_{xx} , Φ_{yy} , Φ_{zz} , характеризующие неоднородность электр. поля, зависят от симметрии окружения. В случае кубич. симметрии окружения ядра квадрупольное взаимодействие отсутствует. В общем случае Φ_{xx} , Φ_{yy} , Φ_{zz} определяются зарядами всех электронов и ядер, окружающих ядра, на к-рых наблюдается ЯКР. Т. к. вторые производные зависят от расстояния r как r^{-3} , то осн. вклад вносят электроны атомов, содержащих исследуемые ядра. Т. о., величина квадрупольного взаимодействия, т. е. спектр ЯКР, зависит от распределения электр. плотности. Это позволяет изучать природу хим. связи в кристаллах.

Важную роль ЯКР играет при исследовании структурных фазовых переходов второго рода, когда при темп-ре перехода T_c возникает связанный с изменением параметра порядка дополнит. вклад в градиенты поля E . Это приводит к изменению температурной зависимости частот ЯКР при $T = T_c$ и служит одним из наиб. точных методов определе-

ния T_c . Кроме того, исследование температурной зависимости частот ЯКР в окрестности $T = T_c$ позволяет определить температурную зависимость параметра порядка [1, 2].

Особую роль ЯКР играет при исследовании т. н. несоизмеримых фаз, где линии ЯКР обладают характерной формой со «всплесками» интенсивности поглощения, отражающей существование в кристалле неоднородного состояния [3]. «Всплески» интенсивности соответствуют вкладу тех ядер, к-рые находятся в области экстремумов поля смещений несоизмеримой волны при линейной зависимости частоты ЯКР от параметра порядка, а также экстремумам и нулевым значениям поля смещений несоизмеримой волны при квадратичной зависимости частоты ЯКР от параметра порядка. Характерная форма линии ЯКР позволяет идентифицировать несоизмеримые фазы в кристаллах и определять температурные границы их существования. Др. метод идентификации несоизмеримых фаз — исследование ядерной квадрупольной спин-решеточной релаксации. В области существования несоизмеримых фаз ядерная и квадрупольная спин-решеточная релаксация убыстряется. Импульсное возбуждение ЯКР и методы квадрупольного т. н. спинового эха позволяют расширить возможности изучения электр. и магн. локальных полей в кристаллах, а также наблюдать сигналы и в неупорядоченных системах [4].

ЯКР является одним из осн. методов изучения внутр. движений в кристаллах, т. к. подвижность атомов влияет как на частоту и форму линий ЯКР, так и на время ядерной квадрупольной спин-решеточной релаксации.

Дефекты кристаллич. решетки приводят к уширению линий ЯКР и их сдвигу, а также к изменению времени ядерной квадрупольной релаксации. ЯКР используется и как чувствительный метод обнаружения радиационных дефектов. ЯКР может реализоваться также не только в результате поглощения радиочастотного эл.-магн. поля, но и при резонансном поглощении УЗ, к-рый модулирует ядерные квадрупольные взаимодействия. Исследования ядерного акустич. квадрупольного резонанса позволяют получать информацию о ядерном квадрупольном спин-решеточном взаимодействии [5].

Лит.: 1) Гречишкин В. С., Ядерные квадрупольные взаимодействия в твердых телах, М., 1973; 2) Блинц Р., Жекш Б., Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики, пер. с англ., М., 1975; 3) Blinc R. [e. a.], NMR lineshape and phase solution effects in incommensurate Rb_2ZnCl_4 , «J. Phys. C: Solid State Phys.», 1982, v. 15, № 1, p. 547; 4) Алексеева З. М., [и др.], Комплексные исследования несоизмеримых фаз в кристаллах прустита и пираргирита, «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1987, т. 51, № 12, с. 2166; 5) Керсилье А. Р., Ядерный акустический резонанс, М., 1969. *В. С. Вихнин.*

ЯДЕРНЫЙ МАГНЕТОН — см. в ст. *Магнетон*.

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС (ЯМР) — резонансное поглощение эл.-магн. энергии в веществах, обусловленное ядерным парамагнетизмом; частный случай магнитного резонанса. ЯМР был открыт Ф. Блохом (F. Bloch) и Э. Парселлом (Э. Пёрселл, E. Purcell) (США) в 1946. ЯМР наблюдается в сильном пост. магн. поле H_0 при одновремен. воздействии на образец слабого радиочастотного магн. поля, перпендикулярного H_0 . ЯМР обусловлен наличием у ядер спинов I , соответствующих им моментов кол-ва движения $J = \hbar I$ и магн. моментов [1, 2]

$$\mu = \gamma_n J = \gamma_n \hbar I = g_n \beta I. \quad (1)$$

Здесь γ_n — гироманг. отношение ядер; g_n — ядерный фактор спектроскопич. расщепления (*Ланде множитель*), имеющий разные значения для разл. ядер; $\beta = eh/2Mc$ — ядерный магнетон (M — масса ядра), к-рый по абс. величине почти в 10^3 раз меньше магнетона Бора. Спины ядер, обладающих нечётным массовым числом A (общее число протонов и нейтронов), имеют полуцелые значения, кратные $1/2$. Ядра с чётным A либо вообще не имеют спина ($I=0$), если заряд Z (число протонов) чётный, либо имеют целочисленные значения спина (1, 2, 3 и т. д.).

Теоретическое описание. В соответствии с классич. представлениями, взаимодействие пост. магн. поля H_0 с магн.